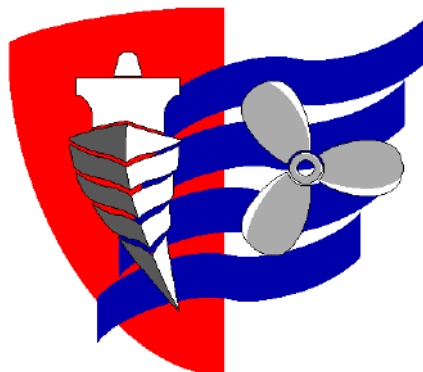


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**EVOLUCIÓN DE LOS MOTORES MAN
MEGI (2T INYECCIÓN GAS A ALTA
PRESION)**

**MEGI ENGINES EVOLUTION (2S HIGH
PRESSURE GAS INJECTION)**

Para acceder al Título de Máster en

INGENIERÍA MARINA

Autor: Xosé Freire Andrade

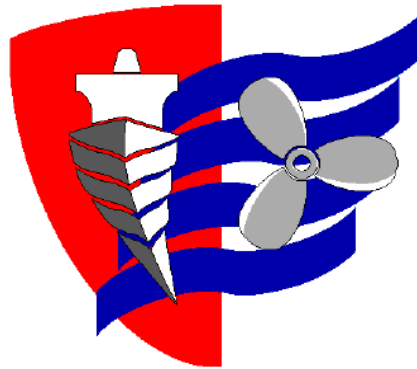
Director: Félix Otero González

Diciembre 2020

ÍNDICE

JUSTIFICACIÓN	5
RESUMEN	5
1. Planteamiento del problema	8
1.1. Explicación de la importancia de la quema de gas en los buques actuales.	8
1.2. Descripción motor meg.	9
2. Metodología.	17
2.1. Nomenclatura	17
3. Desarrollo	21
3.1. Problemas de un nuevo diseño de motor	21
3.2. Válvulas elfi	24
3.3. Pérdidas tubos combustible.	25
3.4. Acumuladores de presión.	28
3.5. Rotura tubos hidráulicos.	32
3.6. Problemas con toberas de inyectores de Gas.	35
3.7. Problemas con lubricadores de cilindros.	38
3.8. Problemas con combustibles de bajo contenido en azufre.	40
3.9. Corrosión en frío.	47
3.10. Problemas con el actuador de la válvula de escape.	49
3.11. Modificaciones del combustible piloto.	51
3.12. Problemas con los sensores de presión (PMI).	53
3.13. Intervalos de mantenimiento	57
4. Conclusiones	59
5. Bibliografía	62
5.1. Documentación.	62

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MEMORIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF:	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 5

TÍTULO

Evolución de los motores MAN MEGI (2T inyección gas a alta presión)

DESTINATARIO

El destinatario del presente Proyecto es la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria, donde se presentará como Trabajo Fin de Máster al objeto de obtener el título de Máster en Ingeniería Marina.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tratará de dar explicación a la problemática ocurrida en un buque de nueva construcción con nuevos sistemas tecnológicos y técnicos para el tratamiento y transporte de LNG, centrados en una nueva motorización a nivel internacional, siendo un motor de 2 tiempos con inyección de gas y gestión electrónica.

Basándose especialmente en la propia experiencia con el cargo de primer oficial de máquinas a bordo de buques de gran envergadura, con motores de gran potencia y con el gas como combustible principal.

RESUMEN

Este estudio técnico trata de dar explicación de una manera sencilla, con apoyo en los informes del fabricante y la experiencia propia, a las modificaciones más importantes llevadas a cabo para subsanar ciertos problemas iniciales ocurridos en un motor marino de nueva tecnología tales como pérdidas de aceite, la activación de seguridades provocando la parada del motor o el ajuste de consumos de combustible líquido. Todo ello tras explicar un poco el funcionamiento de dichos motores y sus sistemas de alta presión.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF:	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 6

Finalmente se exponen algunas conclusiones deducidas de las experiencias vividas a bordo de un buque cuya motorización elegida, entre armador y fletador, han sido motores principales MAN BW MEGI y siendo uno de los primeros buques en el mundo con dicha tecnología.

ABSTRACT

I will try to explain all improvements carried out in this type of engines according experience onboard and always with the maker's support.

For that explanations i will start with an explanation for this engine type, his auxiliars systems and also explaining some problems during this years, with some engine trips, slowdowns or some big oil spills in Engine room for some initial design problems.

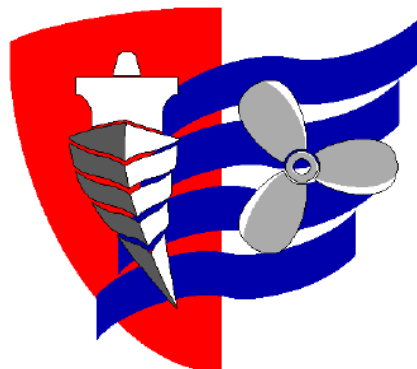
Finally I will attach some documents sent by maker with his studies of the problems and this improvements carried out with explanation.

PALABRAS CLAVE

Motor dual 2T, MAN-BW, motores marinos electrónicos, MEGI, motor inyección gas alta presión 2T.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 7

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 8

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. EXPLICACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA QUEMA DE GAS EN LOS BUQUES ACTUALES.

Hoy en día lo primordial para la instalación de un motor en un buque es ser competitivo en consumos y sobretodo poder cumplir con todas las nuevas reglamentaciones internacionales a nivel de emisiones de NOx y SOx.

Por lo mencionado anteriormente estos motores son escogidos para la mayoría de los buques LNG actualmente y en muchos buques portacontenedores. En los primeros, normalmente se lleva instalado un compresor de alta presión, el cual a partir de ahora llamaremos como HPC (por sus siglas en inglés High Pressure Compressor), el cual aspiraría el gas en fase gaseosa y comprimiría hasta los 330 bar (aproximadamente) y el cual se explicará un poco más adelante, en estos buques también se lleva instalado un dispositivo que es el más común en los buques portacontenedores, una bomba de alta presión, la cual llamaremos a partir de ahora HPP (por sus siglas en inglés High Pressure Pump), dicha bomba es para trabajar con líquido y tras ello vaporizarse en un calentador antes de entrar en el sistema de inyección del motor.

En los buques gaseros se aprovecha el gas transportado en los tanques de carga a diferencia de los portacontenedores u otro tipo de buque que generalmente transportan el gas en algún recipiente, tipo botella a presión, el cuál se comportaría como un tanque más y para el que sería necesario hacer operaciones de “bunkering” cuando fuera preciso.

Por tanto en los buques LNG el precio del combustible mayoritario (en este caso el propio LNG de la carga) el armador/fletador lo tienen a un precio muy bajo, puesto que es comprado directamente en origen. En los buques que tengan una carga diferente a LNG, el precio por m3 de Gas es actualmente

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 9

un precio bastante inferior al LSHFO (heavy fuel oil con bajo contenido en azufre) o al LSMGO (Gasoleo con bajo contenido en azufre) como se puede observar en la siguiente figura.

- IFO 380/180: 7,8/8,1 \$/mmBTU = 300/310 \$/ton
- MGO 0,1% S: 9,9 \$/mmBTU = 400 \$/ton
- Gas TTF: 2,8 \$/mmBTU (lhv)= 130 \$/ton

Fig. 1. Precios Final agosto 2020. Fuente DNVGL

1.2. DESCRIPCIÓN MOTOR MEGI

El motor MEGI es básicamente un motor ME-C del fabricante MAN BW con inyección de Gas a alta presión (300 bar).

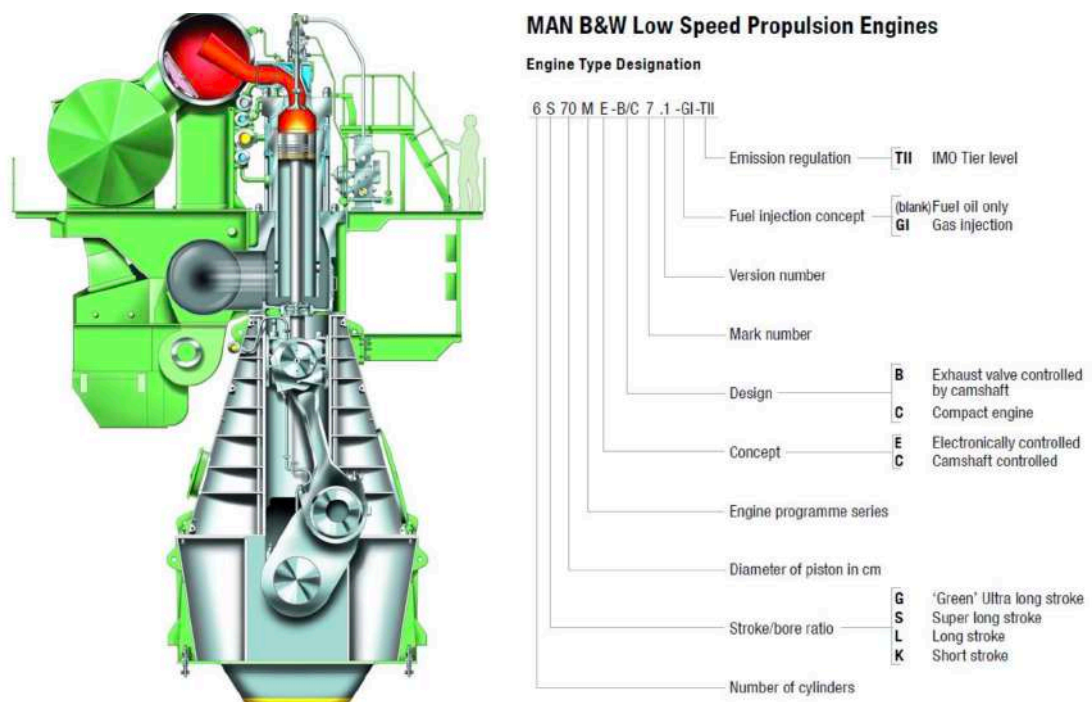


Fig. 2. Sección de un motor MEGI. Fuente MAN

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 10

Por tanto es un motor marino con un ciclo de 2 tiempos y lento. Con la peculiaridad de inyección de gas a alta presión (300 bar) , válvula de escape hidráulica, sistema de alta presión hidráulica y con bombas de inyección independientes en cada cilindro.

Este tipo de motores son muy empleados actualmente por los armadores, motivados a demanda de los fletadores por su bajo consumo, por la versatilidad de este motor para consumir diferentes tipos de combustibles líquidos y cumplir así con las normativas más actuales y restrictivas de emisiones.

En este trabajo se explicarán algunos problemas genéricos encontrados en los diferentes buques con este tipo de motores en el mundo. Mi experiencia personal se centra como primer oficial de máquinas con motores MANBW y son los tipos 7S707MEcGI y el 5S707MECGI.

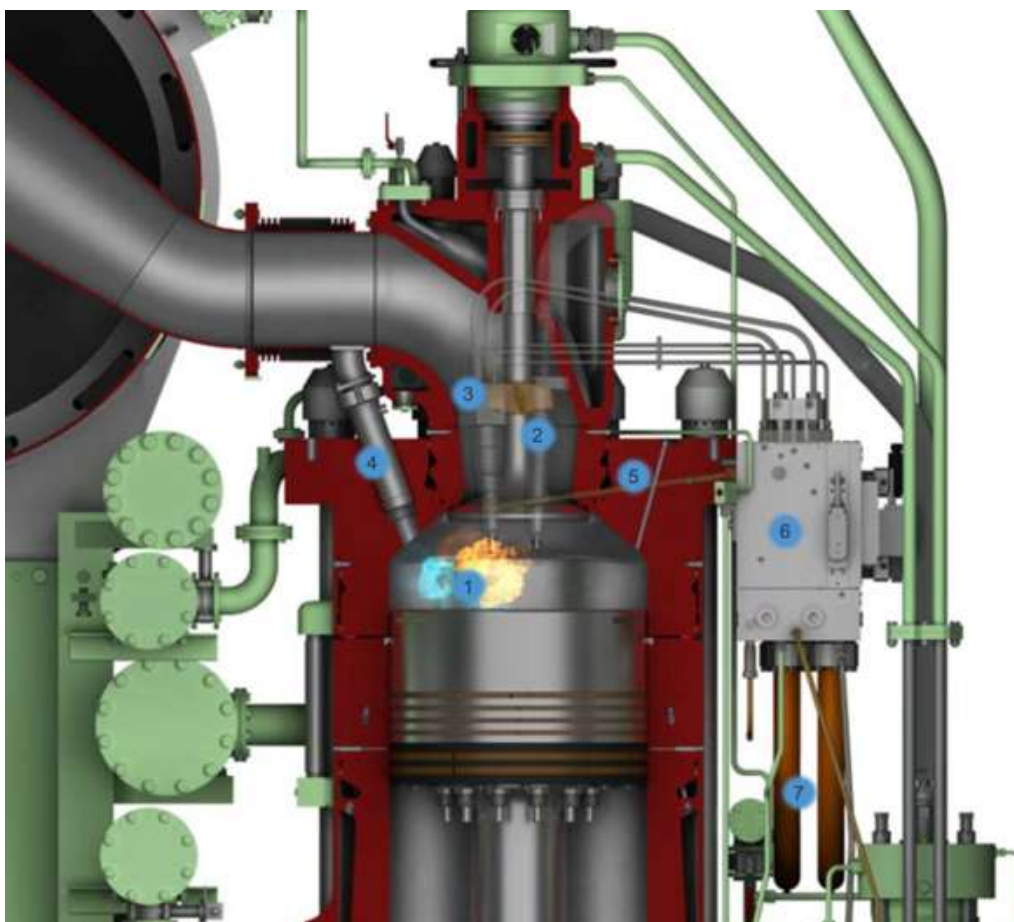


Fig. 3. Inyección combustibles. Fuente MAN

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 11

Como se puede observar en la Fig. 3, las principales diferencias entre un motor 2T tradicional y un MEGI con inyección de gas serían:

1- Amarillo: Combustible piloto

Azul: Combustible GAS.

2- Inyector convencional

3- Inyector de GAS

4- Válvula arranque

5- Canal de distribución de GAS

6- Bloque de gas (distribución de Gas)

7- Doble tubo, tuberías de gas.

El combustible gaseoso sería un gran problema en caso de alguna pérdida en el circuito de inyección, puesto que el LNG crearía una atmósfera explosiva, lo cual pondría en peligro la vida humana de los tripulantes y el propio buque en si mismo. Para evitar este inconveniente es necesario varios sistemas de seguridad para que, en el caso que ocurriese, hubiera lo que se le denomina un “disparo de seguridades”, lo primero que haría este sistema es interrumpir el suministro de Gas al motor, y lógicamente lo siguiente sería eliminar todo el gas que se queda acumulado en las tuberías desde el compresor hasta el motor e incluso en el propio motor.

Para ello existe un sistema de venteo de ese gas en caso de que suceda un malfuncionamiento y luego inertar (el proceso de inertar sería llenar con un gas no explosivo las líneas, generalmente con Nitrógeno) todo el sistema de gas para evitar posibles detonaciones o en el peor de los casos y aún más peligroso, que la combustión del cilindro fuera con llama en retroceso.

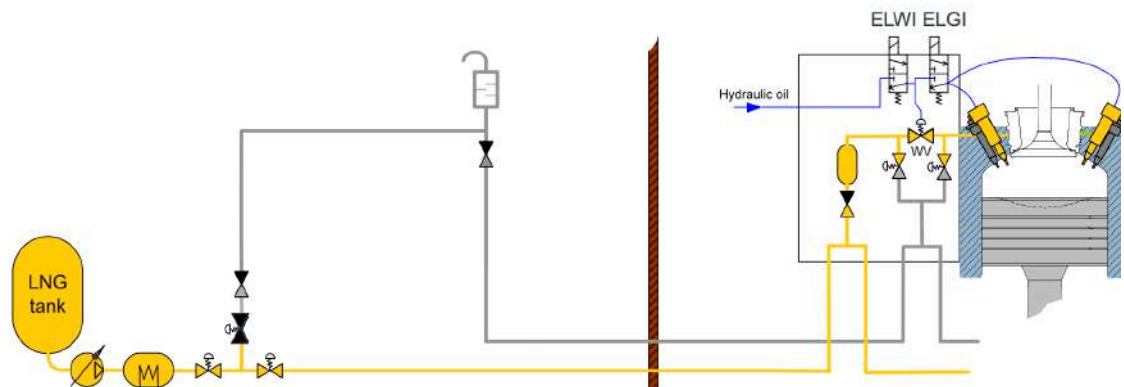


Fig. 4. Sistema de inyección de gas. Fuente MAN

El sistema de gas inerte, como citamos antes, se explicará brevemente para su conocimiento, pero no centrándonos en él, puesto que se trataría de una seguridad más para este tipo de motores.

Todas las tuberías de gas son doble tubo o también llamadas de doble pared, (FIG. 5) por las cuales el gas iría siempre por la tubería interna, y por la externa un flujo de aire comprimido, el cual proviene de los compresores de aire de arranque a 30 bar y tiene una reducción a 6 bar de presión para la línea y con un flujo constante, ésta línea contiene unos ventiladores extractores al final de la misma para ir evacuando ese aire con más facilidad. Estas líneas contienen detectores de gas (los cuales se pueden programar en % volumen o bien el límite de explosividad del gas) si algún sensor detecta una cantidad de Gas por encima de los límites establecidos (normalmente un 15% LEL, que viene siendo el límite de explosividad del gas) el sistema de gas saltaría su seguridad y el motor pasaría a consumir directa y únicamente combustible líquido (HFO, MGO, MDO). Otro motivo para el disparo de dicha seguridad sería el caso en el que algún flujómetro no detectase flujo de aire en esa segunda capa de la tubería (la externa). Tras este disparo de seguridad, todo el circuito de gas empezaría a ventear todo el posible gas remanente a la atmosfera y para ello, se ayuda inyectando gas inerte, (por la tubería interna) en este caso Nitrógeno a toda la línea, pero nunca, lógicamente, inyectándolo al cilindro.

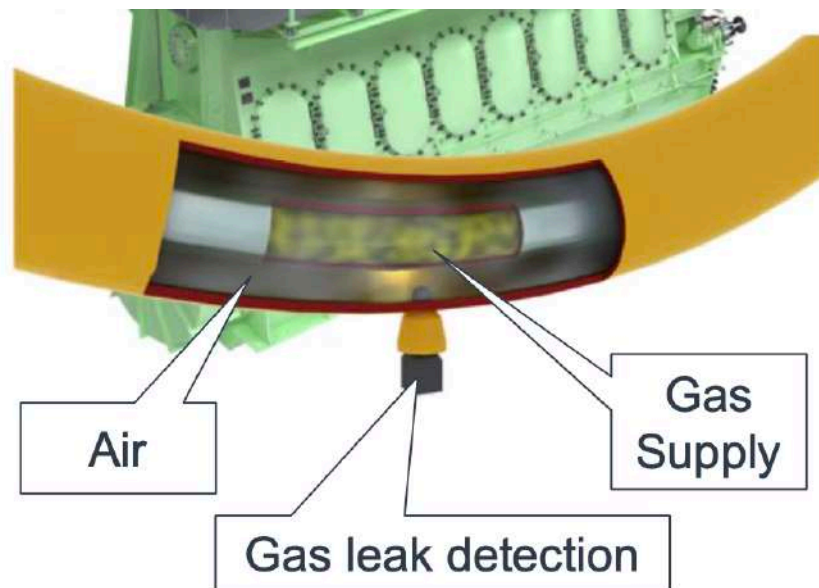


Fig. 5. Sección doble tubo. Fuente MAN

Otro tipo de seguridad que llevan estos motores y que no se le suele prestar demasiada atención, es un transmisor de temperatura del gas antes de entrar en la sala de máquinas, el gas tiene que entrar por encima de los 25 grados centígrados, esta seguridad es instalada para evitar que contenga líquido en la línea y así asegurar que la inyección será únicamente de Gas evitando daños en inyectores y válvulas del motor, puesto que si se introdujese líquido en el circuito a 300 bar, tanto por golpes de ariete como por arrastre de material, los daños serían muy cuantiosos.

Otro sistema para tener en cuenta de diferencia con los tradicionales, el aceite de sello con el que trabajan, dicho aceite es empleado para hacer una separación entre el gas y el aceite de control, y su otra función es ayudar en la lubricación de las partes móviles. Este aceite trabaja a 20 bar de presión por encima de la presión de gas. En caso de que no se llegase a la diferencia marcada por cualquier problema, tanto el sistema de gas como en el de aceite de control, habría otro salto de seguridades como el explicado anteriormente.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 14

Para que el sistema de inyección de gas en estos motores funcione es necesaria la activación mediante presión hidráulica con órdenes electrónicas. Quiere decir que para dar paso a esa presión hidráulica vendría dado por una señal eléctrica, y esa presión hidráulica, cuando llega al inyector de gas, abriría la cámara de gas mediante presión hidráulica. Esto lo podemos ver en la FIG.6 a continuación. El sistema de combustible líquido sería tradicional abriendo inyectores con la presión de combustible enviado por la bomba directamente.

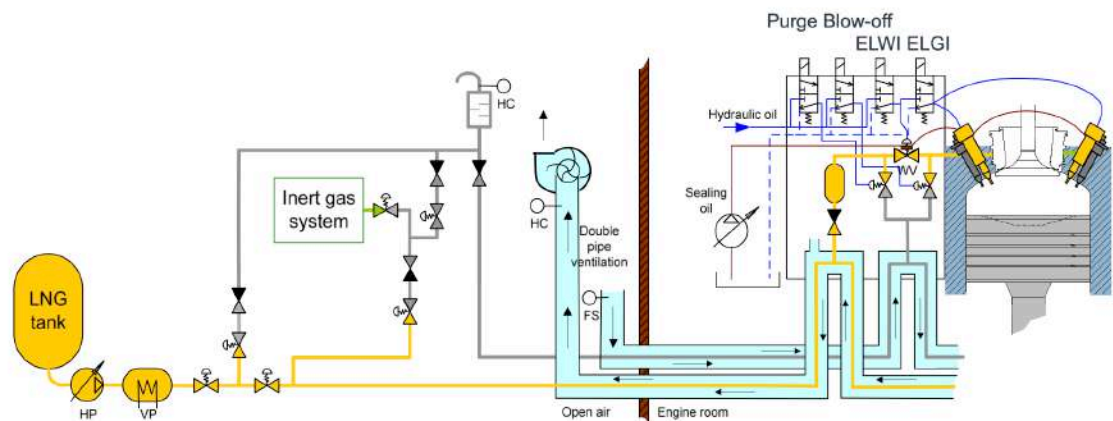


Fig. 6. Sistema de gas inerte. Fuente MAN

El equipo quizás más problemático a bordo y por tanto necesario mencionar y explicar un poco su funcionamiento, sería el compresor de alta presión, dicho compresor es el responsable de aspirar el Gas natural de los tanques, su BOG (Boil off Gas), se estima que un buque gasero realiza sobre el 80% de sus viajes consumiendo únicamente este gas, el cual es la propia vaporización del gas líquido a la temperatura y presión que tiene en ese momento. Es necesario extraer este gas de los tanques para evitar una sobrepresión en los mismos y un calentamiento excesivo de la carga.

Este compresor ha sido elegido y encargado por el fabricante MAN al constructor suizo de nombre Burckhardt, el cual ha cumplido con dicho reto puesto que dicho fabricante es un líder mundial de compresores para buques quimiqueros, ha volcado toda su experiencia en el diseño de un compresor de

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-20.2.2
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 15

alta presión al que han denominado Laby-GI. Dicho compresor tiene que cumplir las exigencias de suministrar 300 bar de presión y 3.000 kg/h con una aspiración a temperatura de -167°C y presión atmosférica.

Éste compresor debe cumplir además una exigencia, la cual, a priori parece sencilla pero ha sido la de mayor problemática, este compresor debe ser muy “flexible” puesto que debería descargar en un rango de 150 a 300 bar dependiendo lo que el motor demande, pero también el mismo debe suministrar el gas necesario para los motores auxiliares a baja presión y para la planta de re licuefacción, incluso con los motores principales parados, por tanto, debería tener 2 descargas independientes dependiendo de la presión demandada o ambas simultáneamente.

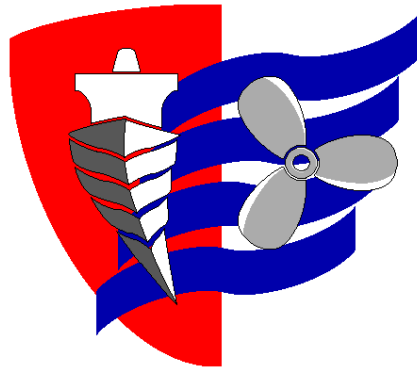
Para todas estas solicitudes, el compresor Laby-GI que Burckhardt diseñó es un compresor de 6 pistones, con 5 etapas, de materiales criogénicos, y en el cual la primera etapa es una etapa sin refrigeración puesto que sería la primera en aspirar el BOG directo de los tanques a una temperatura baja, para aislar las etapas se han empleado sellos laberínticos libres de aceite en las tres primeras etapas, aunque también se les ha instalado un sistema de aros para los pistones que también realizan función de sellado entre etapas.

Se debe reconocer la dificultad de la labor de dichos sellos en etapas puesto que se están hablando con unas presiones alrededor a los 300 bar.

Gracias a este tipo de sellos empleados y a sus materiales, algo no desvelado por el fabricante por motivos de espionaje industrial, puesto que este sector aún es algo demasiado novedoso y muchas manufacturas están estudiando la competencia a dicho compresor, no sería necesario un pre enfriamiento del compresor, se podría empezar a utilizar directamente aspirando del tanque aunque llevase una larga parada anterior.

Cada etapa es seguida con intercambiador de calor para regular la temperatura de entrada en la siguiente etapa del compresor, regulando la misma con válvulas de bypass.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



METODOLOGÍA

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 17

2. METODOLOGÍA.

El método que se va a seguir en este trabajo para poder estudiar y analizar todas las operaciones efectuadas en el motor principal y en el resto de las instalaciones necesarias para su correcto funcionamiento consistirá en ir detallando paso a paso las averías, defectos de funcionamiento, defectos en el montaje, fallos mecánicos, fallos eléctricos o electrónicos, así como cualquier otro problema técnico surgido tanto durante la puesta en marcha del motor como posteriormente en el transcurso de los diferentes viajes realizados por el buque.

Se emplean para la comparación y análisis de fallos, los diferentes libros de instrucciones suministrados por los fabricantes del motor y demás equipos, así como los periodos de mantenimiento propuestos, teniendo en cuenta las aportaciones necesarias de los expertos de la casa constructora y sus decisiones a la hora de modificar piezas o sistemas.

Por lo tanto, es necesario aclarar, que en este trabajo se empleará el método comparativo con todo lo descrito por el fabricante para la venta del motor al armador, y con todo lo que el propio fabricante tenía pensado sobre el mismo. Puesto que se han volcado en toda esta nueva tecnología, la cual ningún fabricante en el mundo había realizado anteriormente y siendo algo completamente nuevo a nivel global. Y gracias a la experiencia a bordo desde la salida de los primeros buques con este sistema veo la capacidad de hacer una pequeña comparación entre la experiencia vivida y la teoría inicial de manuales.

2.1. NOMENCLATURA

Con la gran cantidad de acrónimos que se emplean en este tipo de motores se adjunta una pequeña lista con los más empleados para ayudar a la comprensión de los mismos:

- HPC: Compresor de alta presión (Gas)
- HPP: Bomba de alta presión (Gas)

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 18

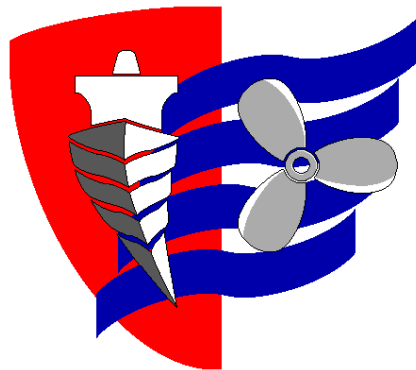
- MPC: Tarjeta electrónica de varios usos (Multi purpose card)
- ACC: Control adaptativo aceite de cilindros.
- ACU: Unidad de control auxiliar.
- AH: Avante
- AL: Lubricador Alfa
- AS: Atrás
- BES: Sistema electrónico Básico
- CCU: Unidad de control del cilindro
- CoCos (-EDS) : Vigilancia controlada por computadora. (Sistema diagnostico del motor)
- CPU: Unidad de procesamiento central.
- ECR: Control de la sala de máquinas.
- ECS: Sistema de control del motor.
- ECU: Unidad de control del motor.
- EICU: Unidad de control del interfaz del motor.
- ELFI: Inyección de combustible electrónica.
- ELVA: Activación electrónica de la válvula de escape.
- EPIC: Perfil electrónico de inyección.
- FIVA: Activación válvula de inyección de combustible.
- FT: Transmisor de flujo.
- HCU: Unidad hidráulica del cilindro.
- HPS: Unidad de potencia hidráulica.
- I/O: Entrada / Salida
- LCD: Dependencia de cambios de carga (lub. Cilindros)
- LOP: Panel de control local.
- LPS: Suministro de baja presión.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 19

- MOP: Panel de control principal.
- PLC: Controlador de programación lógica.
- PMI: Analizador de presión.
- PT: Transmisor de presión.
- PTO: Eliminador de potencia.
- SAV: Válvula de aire de arranque.
- VIT: Variable de los tiempos de inyección.
- XBP: Bypass de gases de escape

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 20

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DESARROLLO

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 21

3. DESARROLLO

3.1. PROBLEMAS DE UN NUEVO DISEÑO DE MOTOR

Lo normal en cualquier instalación es tener bastantes problemas iniciales con su puesta en marcha, y por tanto un buque no iba a ser una excepción.

En este caso se debería sumar a que este tipo de motores han sido una nueva experiencia incluso para el propio fabricante, en el momento de la salida de dique con el primer buque con este tipo de propulsión en el que he navegado solamente había 3 buques en el mundo navegando con esta tecnología, ninguno de los cuales había utilizado el GAS como combustible todavía, esta información, fue dada por los técnicos de MAN BW que llevábamos a bordo para la primera vez que se ponía en marcha dicho sistema. Se tuvo la suerte de ser el primer buque navegando en el mundo con estos motores quemando GAS con todas las experiencias que esto conllevó, aunque por supuesto es algo que ha dado mucha experiencia a todos los tripulantes a bordo en esos momentos.

Muchos de estos problemas vinieron provocados por la incorrecta instalación de elementos de astillero, entre otros, válvulas colocadas en posiciones incorrectas, como ejemplo podría citar que las válvulas principales de gas estaban conectadas en cruz, es decir, cuando querías abrir la principal de babor, pues abría la de estribor y viceversa. Simplemente estaban mal conectados los actuadores, aunque hasta que se reconoció el problema fueron unos momentos de incertidumbre y búsqueda del mismo, puesto que los síntomas eran que no existía presión de gas en el motor que se quería inyectar gas.

Este tipo de problemas solo se citará, como por ejemplo reapriete de casi todas las bridas de a bordo al empezar a navegar con los cambios de temperatura, vibraciones y al empezar su uso con los líquidos o gases por su interior. Muchas alarmas nocturnas en el periodo de máquina desatendida

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 22

provocadas generalmente por pequeños problemas de señales o incorrecta programación de ciertos equipos.

Este trabajo se centrará en problemas que se han vivido con los motores principales, y sobretodo con los defectos de diseño que se han detectado por el fabricante en todos los buques que llevan instalados motores MEGI, puesto que aun se estaba en un periodo experimental. MAN BW tiene instalado un motor de este tipo en Copenhague en sus instalaciones, funcionando permanentemente para realizar sus pruebas y otro en sus instalaciones de Korea con la misma finalidad, la gran diferencia es que esos motores suelen estar a un régimen constante y sin inclemencias meteorológicas que se llevan a bordo provocando el movimiento de un buque.

Sería importante también clarificar que la mayoría de los problemas que se han tenido a bordo con estos motores han sido originados por los compresores de alta presión, aunque son de otro fabricante, como hemos explicado anteriormente, a MAN le conlleva cierta responsabilidad puesto que son los ofertados por ellos mismo para su instalación y desarrollando con colaboración entre ambos. La problemática de estos compresores viene provocada porque con el gas arrastraban mucho aceite de pérdidas de dicho compresor, problemas de empaquetadura en la alta presión, no olvidemos que son compresores trabajando a 300 bar y 3000 kg/h de caudal, estas impurezas sólidas y líquidas son arrastradas hacia el sistema de gas de los motores provocando muchos problemas en el doble tubo de conducción de gas y todos sus elementos como son las válvulas de gas, las cuales se atascaban o incluso llegando a romper asientos de las mismas por culpa de dicha empaquetadura y restos. Este tipo de motores se ha ganado algo de “mala fama” en el mundo actual por muchos problemas pero realmente han sido provocados por el compresor y ciertamente ambos fabricantes se han centrado y volcado mucho con solucionar todos y cada uno de los problemas que se han tenido en los buques.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-30.3.1
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 23

A partir de ahora se dará comienzo a enumerar apartado por apartado, como se comenta en la memoria de este trabajo, las diferencias, problemáticas y ciertos estudios realizados por el fabricante tras los problemas ocurrido a bordo en los primeros años de funcionamiento de esta nueva tecnología:

3.2. VÁLVULAS ELFI

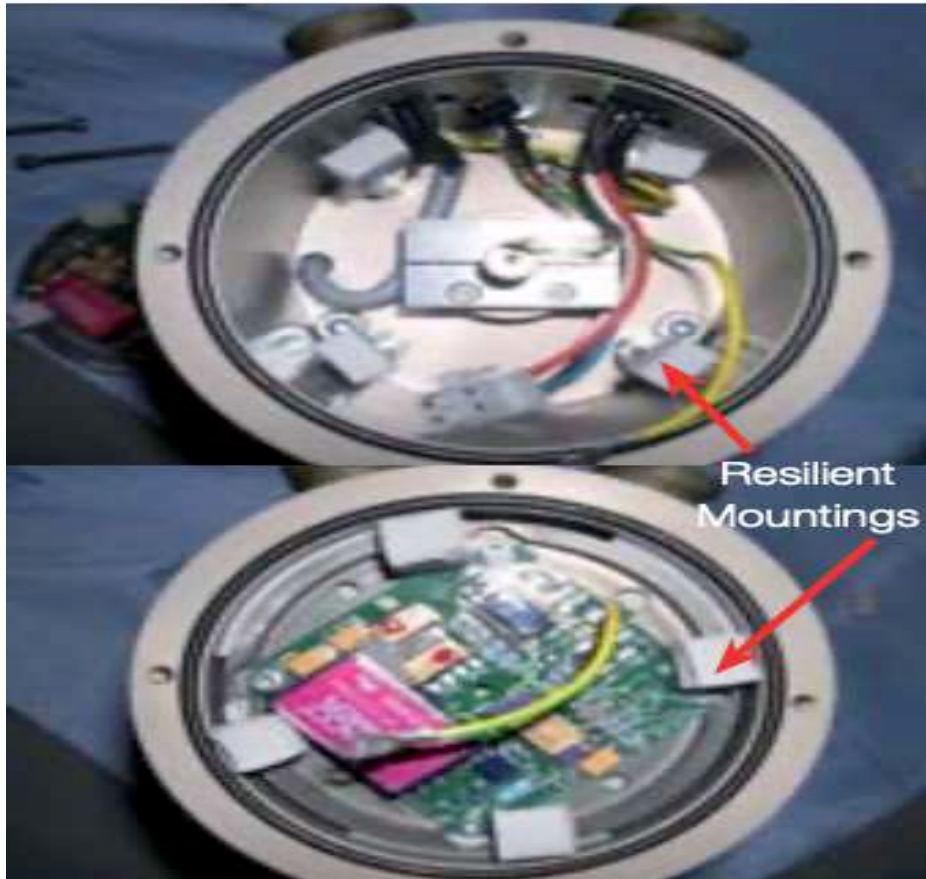


Fig. 7. Válvula ELFI y su modificación. Fuente MAN

La denominada válvula ELFI es la responsable de la inyección electrónica de combustible su acrónimo proviene de su nombre inglés (Electronic Fuel Injection). Dichas válvulas llevan en su interior un convertidor de señal el cual es el encargado de recibir y enviar las órdenes para que dicha válvula abra o cierre.

A este convertidor electrónico se le rompían las conexiones debido a las vibraciones en el motor, para intentar mitigar esos daños se han instalado como modificación unos pequeños bloques de goma que hace la función de

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 25

absorber parte de esas vibraciones y evitar daños en las conexiones eléctricas y en la propia tarjeta electrónica.

3.3. PÉRDIDAS TUBOS COMBUSTIBLE.

Se detectaron en varios buques a nivel global bastantes y preocupantes roturas en los tubos de inyección de combustible, se observaba que existían grietas en los tubos de combustible por un fallo de diseño en la disposición de los mismos, por sus ángulos y lo materiales empleados.

Estaban sometidos a un gran golpe de ariete, siendo éste según la mecánica de fluidos, un fenómeno físico provocado normalmente por cambios repentinos y potentes de presión. Esto provoca una onda de presión en el sentido opuesto y originando con ello un movimiento cíclico muy peligroso para los materiales.

Por tanto se han tenido que rediseñar dichos tubos con una tubería con materiales más flexibles, con unas terminaciones paralelas e incluso se han

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 26

variado parámetros de longitud de la tubería y formando ángulos para reducir los golpes de presión que conllevaban dichas roturas.

Como se puede observar en las fotos que se ven a continuación, en la fig.8 se muestra una de las grietas en la tubería tras realizar la prueba con líquidos penetrantes.



Fig. 8. Grieta con líquido penetrante. Fuente propia

En la fig. 9 se pueden observar las grietas que se han encontrado en los asientos de los tubos de inyección a la salida de la bomba de combustible de alta presión.



Fig. 9. Daños en el asiento para el tubo de inyección. Fuente propia.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 27

En la fig. 10 se puede observar las diferencias entre el diseño original(parte izquierda) y el ya modificado (parte derecha). Se puede observar claramente que el tubo tiene mayor longitud, las terminaciones/conexiones ahora están paralelas y le han diseñado unos codos para mitigar dentro de lo posible los golpes de ariete y sus daños.

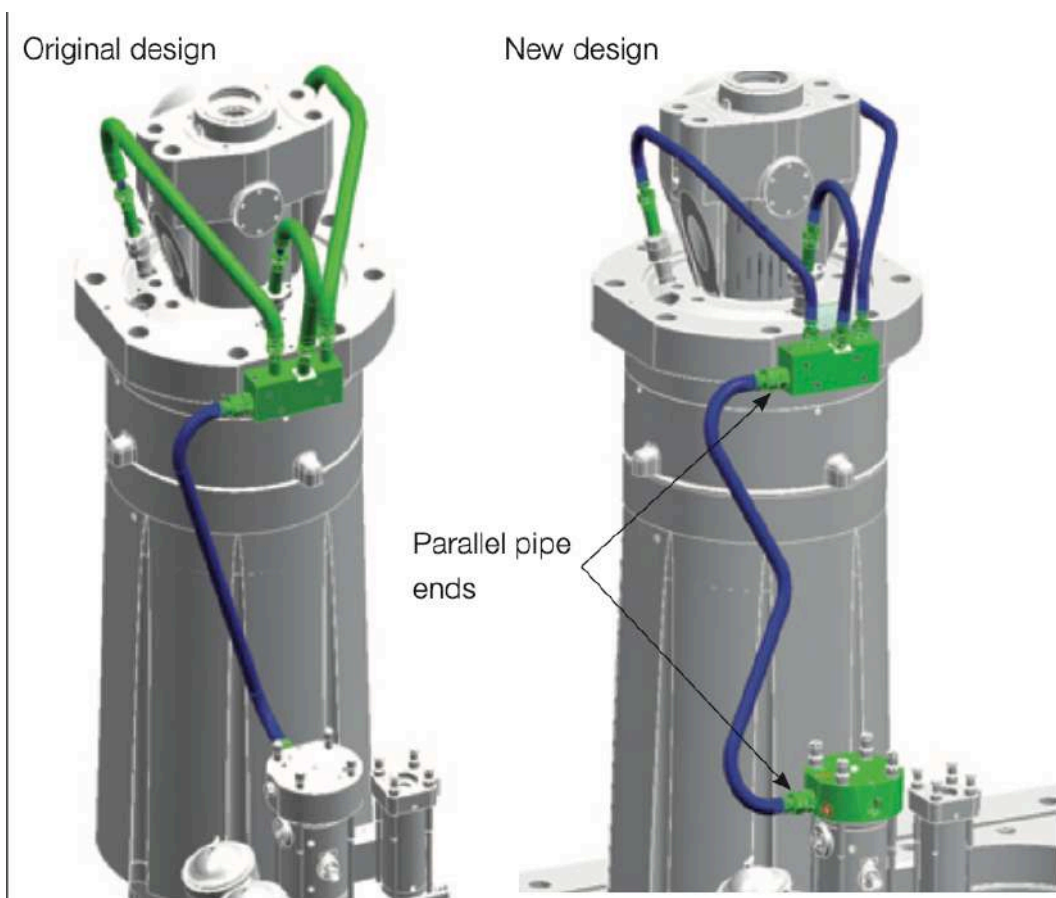


Fig. 10. Diferencia de instalación tubos de inyección. Fuente MAN

3.4. ACUMULADORES DE PRESIÓN.



Fig. 11. Conjunto de acumuladores empleados en cada cilindro. Fuente Hydac

Puesto que los flúidos apenas se pueden comprimir, por tanto no almacenan energía de presión. Para ello con los acumuladores se emplea la capacidad de compresión de un gas, en este caso Nitrógeno, para el almacenamiento de flúidos. Así mantienen una presión hidráulica más constante, sin grande picos de presión.

Estos acumuladores se componen de una parte líquida (comunicada con el circuito hidráulico) y una parte gaseosa (que sería la encargada de comprimirse o expandirse dependiendo de la presión en el circuito hidráulico). Ambas partes están separadas herméticamente por una membrana.

Los antiguos eran de construcción atornillada y con un volumen aproximado de 0,4litros y se sustituyeron por unos de construcción soldada y con un volumen aproximado de 2 litros. En el primer tipo se mantenían problemas con

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 29

la durabilidad de la membrana hermética tras hacer las comprobaciones mensuales y siendo así por tanto muy complicado mantener una presión de aceite estable para la apertura de los inyectores de gas, por tanto se han tenido bastante disparos de seguridades de gas por culpa de estos elementos.

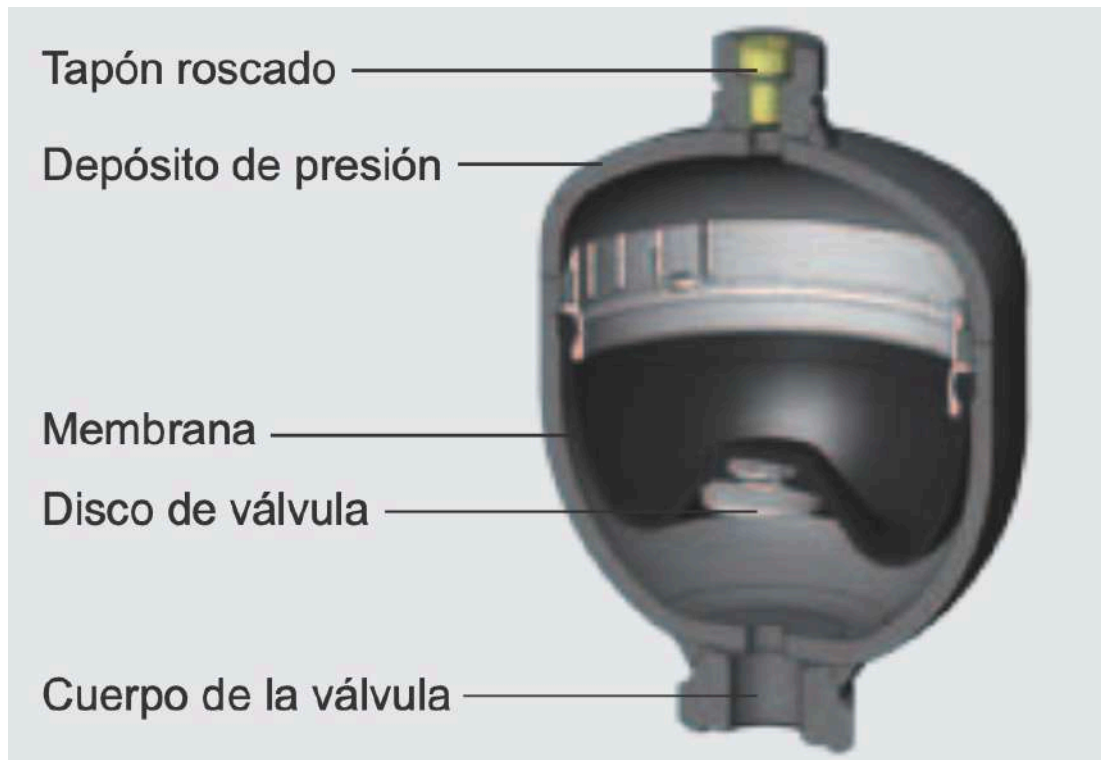


Fig. 12 Sección de un acumulador de construcción soldada. Fuente Hydac

Tras el cambio para todos los buques, por unos de mayor capacidad de la marca HYDAC, los cuales desde hace ya, 18 meses no han fallado y en las comprobaciones periódicas de presión, se comprueban mensualmente, están dentro de valores sin problemas, dichos valores depende de la temperatura

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 30

del acumulador y el fabricante permite una variación de un 5% mensual, pero como valor orientativo la presión de Nitrógeno es alrededor de los 135 bar.



Fig. 13. Vista de acumulador ya instalado en el bloque de GAS. Fuente propia.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 31

Con los acumuladores de la parte del HCU o bloque hidráulico principal en cada cilindro (donde se distribuye la presión hidráulica a cada cilindro) , hubo un problema en ciertos buques, hubo un fallo de diseño con la tornillería que soportaba el acumulador al HCU, y en un barco de nuestra empresa, dicho acumulador rompió la tornillería, salió despedido a una presión de 300 bar doblando 9 cms un mamparo que está a 4 metros de distancia. Este problema llevo acarreada una pérdida de aceite de 13.000 litros, por suerte contenida siempre dentro del buque y más concretamente de la sala de máquinas, puesto que la parte hidráulica de dicho acumulador es la que está en contacto con el circuito hidráulico principal del motor, con un flujo constante de aceite a alta presión.

Se detectó que los tornillos eran demasiado cortos, siendo los originales unos tornillos M12x60 e instalando posteriormente unos tornillos de medidas M12x100.

Por tanto hasta que se encontró el problema el fabricante obligó a que mientras estuvieran los motores principales en marcha no se podía hacer ningún tipo de ronda ni nada similar alrededor de ellos para así eximirse de cualquier posible accidente que pudiera ocurrir, recordemos que la presión de aceite en este punto es aproximadamente 320 bar. Aún modificada la tornillería y ya sin ningún problema parecido reportado internacionalmente desde entonces, MAN BW modificó todos los motores fabricados, con refuerzos en los soportes y en los nuevos buques ahora llevamos un viga en H justo por delante de los acumuladores para que, en caso de rotura, no pudieran salir despedidos con el consiguiente peligro de poder causar daños

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 32

materiales y sobretodo, y más preocupante, daños personales pudiendo causar la pérdida de vida a cualquier operario que se encuentre cerca.



Acumulador

Fig. 14. HCU y Acumulador del mismo. Fuente MAN modificada por el autor

3.5. ROTURA TUBOS HIDRÁULICOS.

Un problema muy recurrente han sido pérdidas de aceite por roturas de los tubos de alta presión de aceite que van desde el bloque de gas a cada inyector de gas, este defecto con los tubos se dedujo que rompían a causa de vibraciones y roces entre los mismos, por tanto el fabricante ha creado unos soportes de aplicación necesaria para todos los motores que tenía en el mercado y ordenaron su instalación para minimizar dichas vibraciones y a su vez tener la función de distanciador entre los propios tubos. Desde dicha

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 33

solución el problema fue correctamente solucionado y sin roturas o por lo menos no de manera tan continuada.

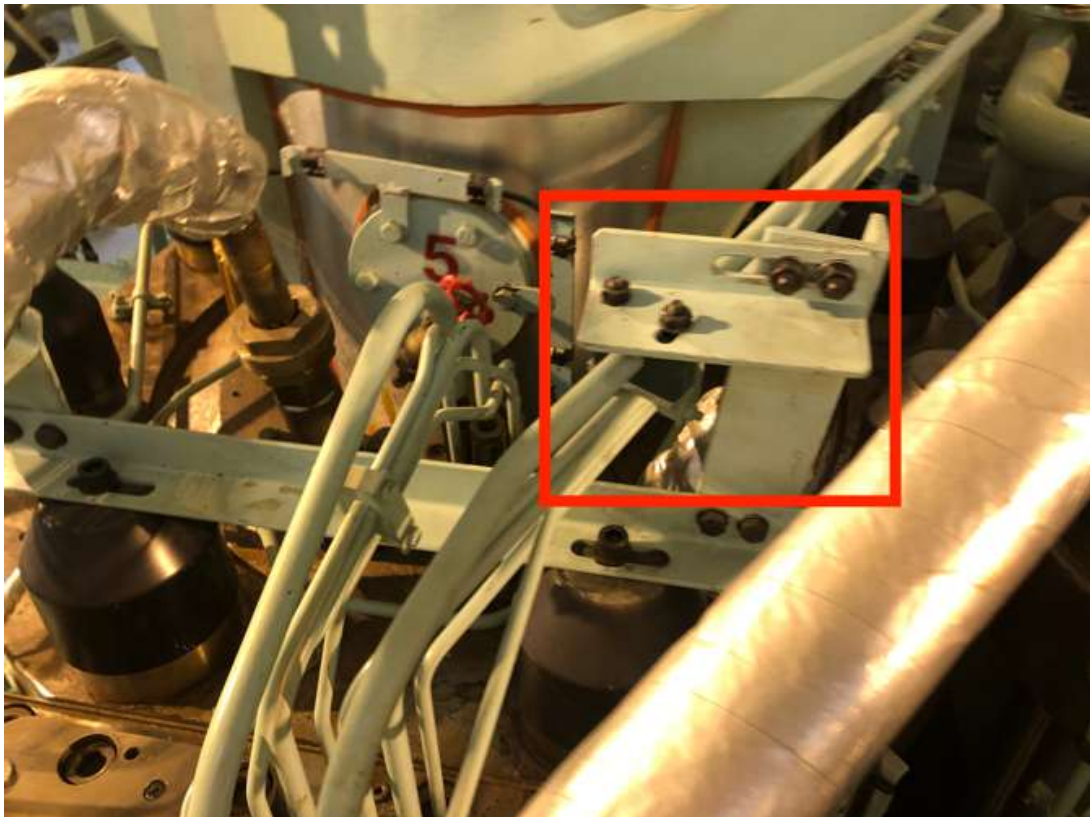


Fig. 15. Soporte creado por el fabricante para los tubos de alta presión hidráulica. Fuente propia.

Otro problema que fue muy recurrente, y quizás el más dañino en el inicio de estos motores, era la rotura de la tubería de alta presión de aceite (320 bar) que comunica el actuador de la válvula de escape con el bloque de alta presión hidráulica, esta tubería es la que conduce el aceite de retorno al circuito hidráulico tras hacer el trabajo de apertura de la válvula de escape. Para la apertura ya desde el inicio han sido tubos flexibles. Dicho tubo en su inicio era de acero y rígido con 2 codos a 90°, tras muchas roturas en toda la flota instalada a nivel internacional, el fabricante decidió sustituir todos los dichos tubos por una manguera flexible, con dichas roturas de tubos, en nuestro caso se podría hablar de unos 3 tubos por semana con la pérdida

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 34

acarreada a dicha rotura , en los buques de esta compañía la menor fueron 3.000 litros de aceite y conllevó entre otras medidas de seguridad, por ejemplo eliminar el sistema de UMS (Máquina desatendida) puesto que si este fallo ocurre, lo primero es parar de emergencia dicho motor y a continuación cerrar cuanto antes el paso de aceite hidráulico a ese cilindro para contener la pérdida lo máximo posible.

Tras la instalación de la manguera flexible, no ha habido más roturas ni más problemas.

Según el fabricante, el antiguo tubo rompía debido a las vibraciones y a los golpes de ariete que recibía el aceite con las aperturas y cierres de la válvula de escape, un caso muy similar al comentado en el punto 3.3 de las roturas de los tubos de combustible, aunque con solución algo diferente.

Ahora mismo se sigue investigando para intercambiar dicha manguera flexible por una mixta, motivado por las legislaciones vigentes y sus certificaciones de clase (Sociedad de clasificación), si la longitud de la manguera flexible en alta presión supera el 1.5m se tienen que reemplazar cada 2 años de uso y si la medida es inferior a 1.5m sería el reemplazo cada 5 años, ese es el motivo por el cual el fabricante está estudiando hacer un tubo mixto y reducir dicha medida para economizar costos de mantenimiento del motor, la distancia de la manguera instalada en estos momentos es de 2,4 metros.



Fig. 16. Manguera flexible para el retorno hidráulico de la Válvula de escape. Fuente propia.

3.6. PROBLEMAS CON TOBERAS DE INYECTORES DE GAS.

Los inyectores de gas son muy similares a cualquier inyector de combustible líquido tradicional, la mayor diferencia es que la apertura de dicho elemento viene provocada por presión hidráulica de aceite y no del propio combustible, una vez dicha presión “abre” el paso, es cuando el gas es inyectado al cilindro, y el elemento por el cual el combustible se distribuye es por los orificios de la tobera que sería la única parte que está en el interior de la cámara de combustión.

Este elemento está expuesto a una presión de gas aproximada fluyendo por su interior de 315 bar a unos 35°C y su cara exterior la temperatura que soporta es aproximadamente unos 650/700°C de la cámara de combustión, las temperaturas empleando el gas como combustible son más altas que con los combustibles líquidos más tradicionales, por ese motivo, aún el fabricante intentando poner toda su gran experiencia con los motores de 4 tiempos a gas, reconoció problemas de diseño en estos motores y estos elementos, aunque la información de materiales empleados en las anteriores

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 36

o las modernas es muy privativa por la “pelea” que existe a nivel internacional por conseguir un motor 2T eficiente con inyección de gas.

En este caso, tras la salida inicial los motores venían con un tipo de toberas/atomizadores en los inyectores de Gas, las cuales, eran de unos 5 cms de largo aprox. y con forma esférica, tras las primeras 4.000 horas de los motores se desmontaron para su inspección, en la misma se detectó un número muy alto de éstas con grietas bastante importantes, en algún caso cruzando la longitud completa de la misma, y este descubrimiento se realizó en todos los buques navegando en ese momento con ese tipo de motor.

Tras llevárselas a analizar, el fabricante dedujo lo mencionado anteriormente y reconoció un fallo en su diseño y el problema era que estaban agrietándose por la alta temperatura, por su forma y el material que quizás no fuera el óptimo para la situación a la que estaban sometidas en este tipo de motor y condicionantes.

El siguiente paso tras un nuevo diseño se enviaron unas toberas de una longitud similar, pero, en este modelo, la cabeza ya era tipo achaflanada y otra aleación. En este caso, las toberas tras 2.000 horas, cuando se desmontaron para su inspección, también se apreciaron grietas en las mismas. En este caso, en un porcentaje menor de toberas afectadas, las órdenes de MAN eran hacer ensayos y solo instalar 9 de 21 inyectores en cada motor con este modelo en pruebas.

Tras los análisis del modelo anterior el constructor envió otro modelo, que son las instaladas actualmente, éstas son más cortas (unos 2,5 cms más cortas que las anteriores), éstas tienen sobre unos 3cms de longitud y cabeza achaflanada. En este modelo, hasta el momento, no se han detectado grietas tras sus inspecciones periódicas.

Otro problema importante que tienen estos motores con el tema de toberas de los inyectores de gas, es que dichas toberas se acaban obstruyendo cuando pasan las horas de funcionamiento del motor, con los consecuentes problemas que conlleva, esto provoca grandes desviaciones de temperatura entre cilindros puesto que se tiene restricciones de flujo y por tanto no se está inyectando la misma cantidad de gas entre cilindros. Esto implica, además,

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 37

que si esta diferencia es muy notoria, habría mucha diferencia entre las temperaturas de los gases de escape de cada cilindro y se tendría un disparo de las seguridades para la quema de gas como combustible.



Fig. 17. Vista de una tobera de gas deteriorada. Fuente propia.

Como podemos observar en la Fig 17, la tobera remarcada, es una con ese problema de manera clara. La solución del fabricante para este problema aún está siendo analizada, aunque, hoy en día, se han dado 2 soluciones posibles, una de ellas funciona solamente en algunos casos y la otra es demasiado laboriosa y sería una solución temporal. Expondremos las 2 a continuación:

- a) Mantener el motor a un régimen superior al 80% de carga, a combustible líquido (HFO o MDO), y con el sistema de gas en stand-by, nunca en “off”. La explicación de esta solución es porque a esa carga mantendríamos un aceite de sello sobre los 310 bar y manteniendo el gas en modo stand by, se tendrían pérdidas de aceite

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 38

de sello a través de las toberas, lo que ayudaría a su limpieza, este proceso se lleva a cabo durante unos 40/45 minutos.

No funciona siempre, si las toberas están ya demasiado sucias este método no es útil, puesto que ya no es suficiente para la limpieza.

- b) Se ha enviado un “kit” de limpieza para dichas toberas a todos los buques, el cual está compuesto por un cepillo de alambres fino y un juego con 3 brocas, con un porta brocas manual, cada broca es para un orificio concreto de las toberas. Este método es muy válido y se recuperan bastante bien las toberas, el mayor problema encontrado es que para llevar a cabo esta solución ya se tendría mucho trabajo con relación horas/hombre, cuando por ese trabajo, sería el mismo que emplearíamos para reemplazar por una nueva tobera y eliminando así el problema.

En estos momentos el fabricante está estudiando un diseño para que los inyectores de gas vayan inyectando aceite de sello continuamente al interior del cilindro, solo para intentar evitar estos problemas de taponamiento de las toberas. A los problemas que se enfrentan ahora mismo con esto, es a los consumos de aceite, puesto que los armadores no están muy dispuestos a ese aumento de consumos, y el más importante, es que tendrían que realizar unas modificaciones para instalar más tuberías hidráulicas en las culatas a estos inyectores. Por estos motivos sigue un poco parado éste estudio.

3.7. PROBLEMAS CON LUBRICADORES DE CILINDROS.

En este tipo de motores, cada cilindro lleva instalada de manera independiente su propia lubricación, la cual es producida mediante los denominados alfa lubricadores. Este elemento, entre otras de sus partes, llevan una válvula de 3 vías y 2 posiciones que permite el flujo de aceite en dos direcciones diferentes debido a sus 3 vías, dicha válvula 3/2 es la encargada de dar señal de retorno (feedback) con el paso de aceite al detectar y mover con dicho flujo la posición del actuador del lubricador y así dando señal a las seguridades del motor para detectar si hubiera algún problema de lubricación en algún cilindro.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 39

Durante unos 18 meses se ha tenido sobre 2 ó 3 cambios semanales de dicha válvula para el feedback, esta avería en algunos buques ocasiona bastante problemática, puesto que el motor tras detectar esa avería pasaría a una reducción de velocidad (slowdown) al ponerse en un modo de protección, lo que conlleva, en los buques con generadores de cola (PTO) una desconexión inmediata tras bajar la frecuencia y con esto un grave riesgo de una caída de planta total (blackout), normalmente funcionan bien las seguridades y solo se activan las desconexiones preferentes (preferential trip) eliminando los equipos menos críticos para mantener la planta estable.

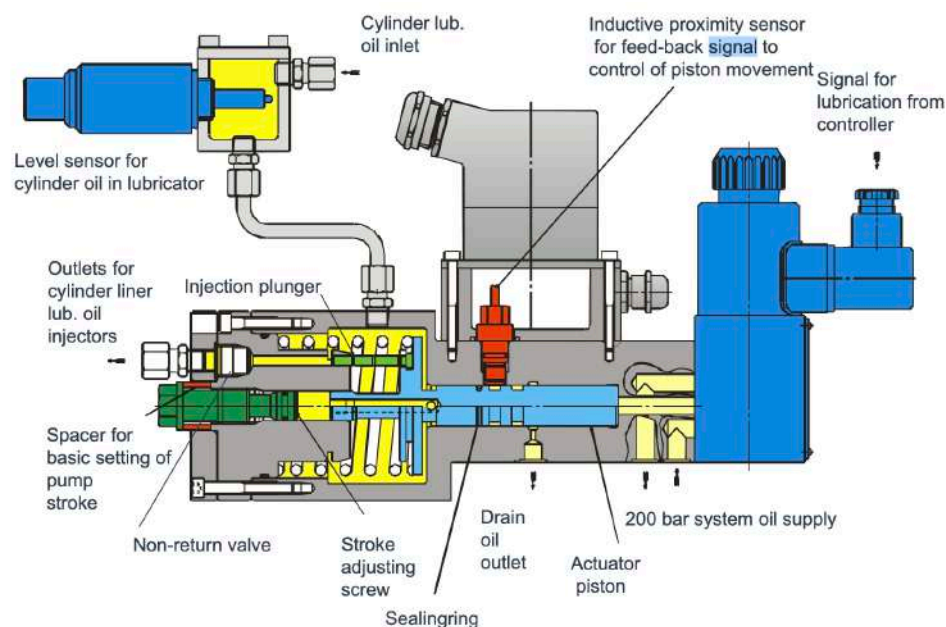


Fig. 18. Esquema de la sección del lubricador de cilindros. Fuente MAN

Tras las investigaciones pertinentes tanto por el personal de a bordo como por el propio fabricante, se llegaron a encontrar daños en dichas válvulas, con orificios dañados y bloqueados con impurezas, las cuales se analizaron y se detectó que eran parte de los asientos de las válvulas de corte de presión hidráulica (siendo éstas la anteriores al lubricador en el circuito hidráulico). Dichos asientos eran de un material demasiado blando y el cual no aguantaba correctamente el flujo de aceite a dicha presión (en este caso 200bar) y para

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 40

ese caudal, por tanto, se acababa dañando y arrastrando bastante material. La solución ha sido meter válvulas de otro fabricante y ahora también, en el circuito hidráulico, mensualmente tiene que ser filtrado el aceite por un filtro más fino (de 25 micras), que es llamado (SFF, de sus siglas inglesas Super Fine Filter), esta operación es necesario realizarla con el sistema de alta presión parado y cuyo procedimiento es bastante sencillo, puesto que solo es necesario cambiar un filtro que lleva de back up en el propio filtro automático, por el SFF y dejar el fluido circulando por el mismo durante 2 horas. Tras dicha operación volver todo a su filtro original y dejar el flujo circulando por el propio filtro automático de la marca BollFilter.

3.8. PROBLEMAS CON COMBUSTIBLES DE BAJO CONTENIDO EN AZUFRE.

Este tipo de motores al ser muy versátil también conlleva alguna que otra complicación a mayores, en este caso han tenido algún problema por culpa de poder consumir tanto HFO como MGO o Gas, y dentro del modo GAS, el sistema piloto, dicho sistema es el empleado siempre con combustible líquido para controlar las detonaciones dentro del cilindro, con dicho sistema se inyecta un combustible líquido para ayudar en la combustión del gas y evitar autodetonaciones; dicho sistema podría emplear cualquiera de los combustibles líquidos mencionados anteriormente.

El primer problema que se encontró en el empleo de combustibles líquidos con bajo contenido en azufre fue la lubricación de los cilindros, puesto que por las propiedades lubricantes del propio combustible habría bastantes diferencias, incluso llegando a variar la ubicación de los puntos fríos en el interior del cilindro. Para intentar solventar este problema, en los motores iniciales, se llevaban 2 tanques de aceite de cilindros en servicio (cada cual contenía un aceite con un BN diferente), tras estos tanques iría instalada una válvula 3 vías que simplemente cambiaría de que tanque consumir dependiendo del combustible empleado en cada momento de manera automática. Siendo estos tanques con aceites del tipo BN25 y BN100 (BN es el número base del aceite). Emplearía el de BN25 para combustibles con poco

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 41

azufre, modo GAS o modo MGO/MDO y el BN100 para el caso de ir con combustible con un contenido de azufre superior como el HFO o el LSHFO.

Eso era la teoría, en la práctica y tras ir las inspecciones de pistones/cilindros mediante el colector de aire de barrido cada 1500 horas del motor, se pudo ir observando (normalmente en el caso de estos motores se suele navegar un 90% del tiempo a modo GAS) que tendía a acumularse una cantidad de depósitos importante en cada inspección en la cabeza de los pistones, más de lo común. Por tanto, la decisión temporal tomada por el fabricante ha sido que cada 48 horas se mantuvieran, manualmente, los motores con BN100 incluso con combustibles con poco contenido en azufre, puesto que las propiedades de este aceite ayudan a la eliminación de depósitos. Poco a poco se observó que esos depósitos se iban deshaciendo y desapareciendo. El mayor problema a nivel internacional en este caso lo estaban teniendo unos buques que solo navegaban por aguas estadounidenses, puesto que habían sido diseñados para consumir siempre MGO y ya no se había planteado en ningún momento instalar ni el tanque de BN100 ni la válvula 3 vías, por tanto sus motores tenían que ir siempre con BN25, tras dicho error todos los costes y modificaciones han sido absorbidas por el fabricante MAN BW. Estos buques eran portacontenedores del armador TOTE Shipping, los cuales trabajan con botellas de LNG presurizadas en cubierta.



Fig. 19. Vista de un cilindro pulido por impurezas en el pistón. Fuente Propia

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 42



Fig. 20. Impurezas en la cabeza de pistón. Fuente MAN modificada por autor.

Aquí se puede observar en la Fig. 19 ese problema citado, por tanto, el mayor problema al que uno se enfrenta con estos depósitos es provocar pulidos en la camisa conllevando así un desgaste prematuro del material, siendo más fácil también el agarrotamiento de algún aro del pistón, por este motivo la preocupación era bastante alta.

En la fig.20 podemos observar la gran cantidad de depósitos en la pared de un pistón, el cual es el que provoca con su movimiento el pulido de las camisas/cilindro.

En este tipo de motores es sencillo hacer una inspección de cilindros y pistones puesto que, gracias a su gran tamaño, es posible entrar sin mayor dificultad andando por el colector de aire de barrido, que viene siendo el colector por donde entraría el aire para cada cilindro para las combustiones, está ubicado en la parte baja de los cilindros. Los cilindros llevan unas aberturas llamadas lumbreras por las cuales entraría dicho aire y por las cuales podemos observar el pistón una vez ubicado el operario en posición.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 43



Fig. 21. Operario en el interior del colector de aire de barrido para inspección. Fuente propia.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 44

Así fue como se iban encontrando estos pistones durante las inspecciones, se puede observar claramente los depósitos acumulados en la zona entre los aros del pistón empleando aceite BN25.



Fig. 22. Aros del pistón vistos a través de lumbrera tras trabajar con aceite BN25 . Fuente propia.

En la Fig. 23. se puede observar la diferencia y el resultado tras utilizar el BN100 un par de meses alternando ambos aceites, la limpieza se ve claramente en la cabeza del pistón.



Fig. 23. Aros del pistón vistos a través de lumbrera tras alternar aceites BN25 y BN100. Fuente propia.

Ahora el problema planteado sería recurrir a algún sistema que fuera definitivo para no depender al 100% del operador y no llevar el modo de lubricación activado en modo manual y dejando así que el propio sistema electrónico del

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 46

motor hiciera dichos cambios, para ello MAN diseñó un sistema denominado ACOM (Automated Cylinder Oil Mixing) este sistema se ha instalado ya en todos los buques de nueva construcción y se está realizando actualmente el cambio en los buques más antiguos, este sistema funciona básicamente mezclando porcentajes de aceite BN25 y BN100 para producir por si mismo una mezcla entre ambos, la cual es reclamada electrónicamente para la óptima lubricación de los cilindros y evitar así un gran problema si se utilizase incorrectamente el tipo de aceite o bien la cantidad a emplear, dicho problema sería en este caso la corrosión en frío y es lo que el fabricante intenta evitar a toda costa.



El sistema ACOM trabaja a ordenes de los cálculos del MOP (Main operation Panel) , dependiendo del contenido de azufre que contenga el combustible empleado en cada momento, esto es muy importante para la correcta preservación del motor y mantener unos correctos intervalos de horas de mantenimiento.

Fig. 24. Equipo ACOM.
Fuente MAN

Otro problema que se ha encontrado el fabricante por el uso de combustibles de bajo contenido en azufre han sido los materiales de los aros de los

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 47

pistones, para este tipo de motores han tenido que rediseñarlos y modificarlos, se ha tenido que introducir una protección CERMET, este tipo de protección viene dada como su nombre indica por una mezcla de materiales cerámicos (CER) y metales (MET), este tipo de recubrimiento tiene que ser medido sus espesores cada 500 horas de funcionamiento con un medidor de espesores por ultrasonido suministrado por el propio fabricante MAN BW.

3.9. CORROSIÓN EN FRÍO.

En estos motores también se ha detectado que cuando se trabajaba con ellos a una baja carga, por debajo del 40%, había problemas en los cilindros por una bajada de temperatura importante en la propia camisa, por tanto habría problemas con la denominada corrosión en frío. (Cold corrosion) .

Para subsanar este problema el fabricante ha modificado numerosos elementos para contener la temperatura del agua de camisas, aire de barrido y así ayudar a mantener una temperatura con menos fluctuaciones y a su vez óptima para la combustión y los materiales. Entre las otras soluciones utilizadas son:

a) Un bypass en el agua de refrigeración de camisas en el cual, la cantidad de agua a determinar viene dada por unos orificios en las tuberías de salida del cilindro. Al puentear sobre el 85% del agua de camisas conseguimos aumentar aproximadamente la temperatura en las paredes del cilindro sobre 15°C. Además también se consigue que el agua de refrigeración a la salida

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 48

de las camisas suba aproximadamente unos 20°C por tanto así podemos evitar la corrosión en frío.

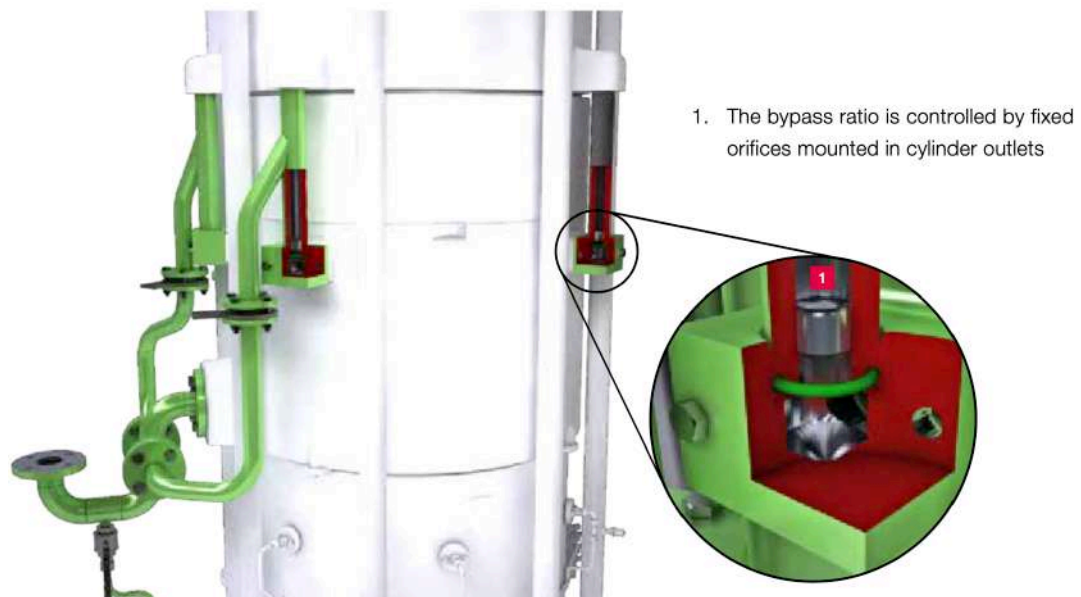


Fig. 25. Sistema de orificios y bypass para el agua de camisas. Fuente MAN

b) También se está empleando ahora un sistema de bypass más activo que consiste en la instalación de 2 tuberías adicionales de agua de refrigeración a lo largo de todo el motor, una bomba extra y una válvula de control a mayores, asegurando así una temperatura del agua de 130°C y poder mantener una temperatura entre 80 y 90°C para las culatas y la válvulas de escape . Si no, para mantener una alta temperatura, sería necesario una carga aproximada en el motor de un 90%. Este sistema es el conocido como LDCL (Load dependent cylinder liner) , y que este sistema vaya instalado o su instalación

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 49

posterior no influye en la conexiones de refrigeración del buque, puesto que es un sistema compacto que se instala directamente sobre el propio motor.

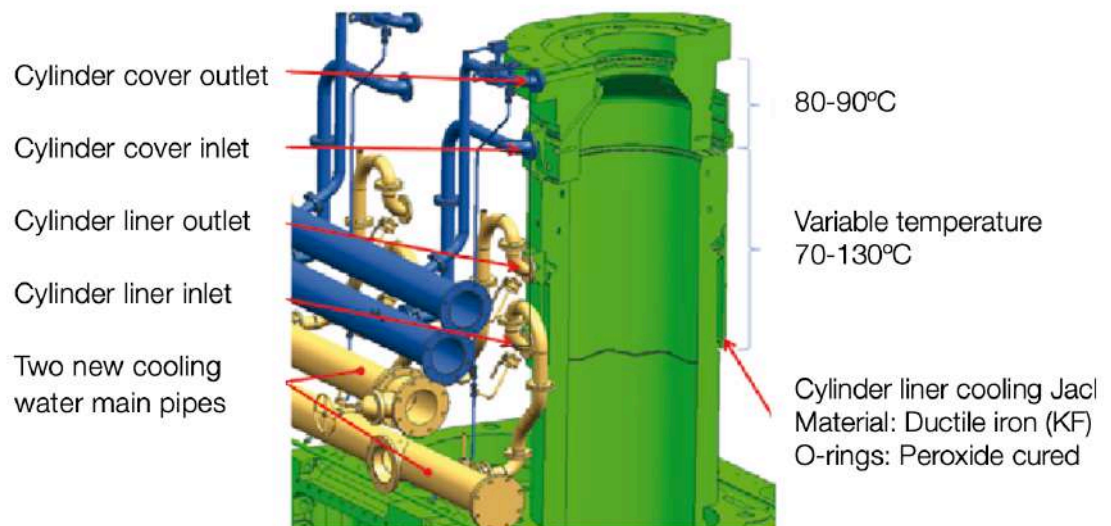


Fig. 26. Sistema LDCL. Fuente MAN

Los resultados de estas modificaciones están demostrando una significativa reducción de la cantidad específica de aceite de cilindros con este sistema.

3.10. PROBLEMAS CON EL ACTUADOR DE LA VÁLVULA DE ESCAPE.

En algún buque de nuestra compañía se encontraron problemas con el actuador de la válvula de escape debido, según MAN a cavitación motivada por la presión hidráulica, éste problema lo habían tenido antiguamente con sus motores y la solución fue modificar la válvula FIVA, puesto que esta es la encargada de la apertura de la válvula de escape, y así hacer que el movimiento de apertura y cierre fuera algo más suave para evitar tanto golpe en la válvula, asiento y actuador.

Tras un tiempo de inspecciones parece que los problemas seguían existiendo y aún se mantienen actualmente a bordo. Su diagnóstico es un ruido metálico

tipo golpe seco a la altura de la válvula de escape, es un sonido muy característico y fuerte, pudiendo oírse desde casi cualquier rincón de la sala de máquinas.

Al parecer se dedujo que estas grietas o roturas provienen del efecto “pegamento” que viene a decir, que las piezas mecánicas cuando están contacto y con el aceite se quedan pegadas entre si, cuando se mueven, la parte móvil del actuador arrastra consigo al asiento que se tendría que quedar fijo en el bloque, conllevando sacarlo de posición y moverse una parte que está diseñada para estar fija y no soportar ciertas fuerzas que moviéndose le ocurren. Para ello MAN ha modificado las piezas, haciéndoles un relieve para que dificultar que se queden “pegadas” al tener una superficie rugosa y por tanto menos superficie de contacto.

Problem

“Glue” effect between piston step No. 1 and distributor block, causing a launch delay for piston No. 1.

Countermeasure

Grinding grooves in piston No. 1 for easy relief. Grooves: 8 x R 0.5 mm w. depth of approx. 0.3 mm.

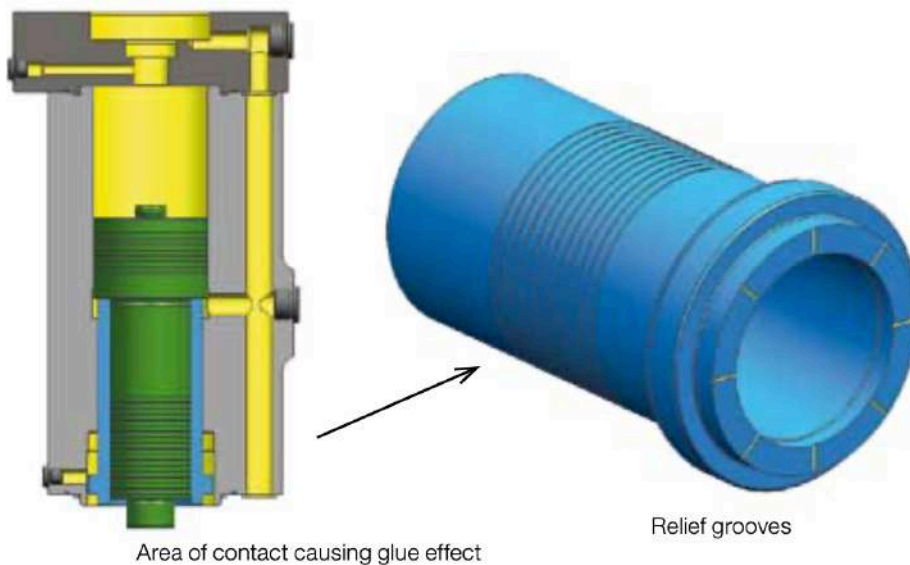


Fig. 27. Modificación necesaria en el actuador de la válvula de escape. Fuente MAN

3.11. MODIFICACIONES DEL COMBUSTIBLE PILOTO.

Este tipo de motores llevan un combustible que es llamado “combustible piloto” o de pilotaje. Dicho combustible es utilizado cuando el motor va en “Modo Gas” y es empleado entre otros motivos, por normativa legal, puesto que por seguridad cualquier motor marino debe inyectar una parte de combustible líquido y un sistema de back up que entre al cilindro siempre en caso de fallo del sistema de gas, sin parar el motor en uso.

Otro de los motivos muy importante del combustible piloto es controlar el momento de la explosión/quemado del combustible (en ese caso del GAS), al inyectar el combustible líquido en el momento que se quiere, se consigue con ello tener el encendido en el punto exacto que deseado y evitar así problemas de autoencendido en el cilindro y evitar al mismo tiempo puntos calientes en lugares no deseados.

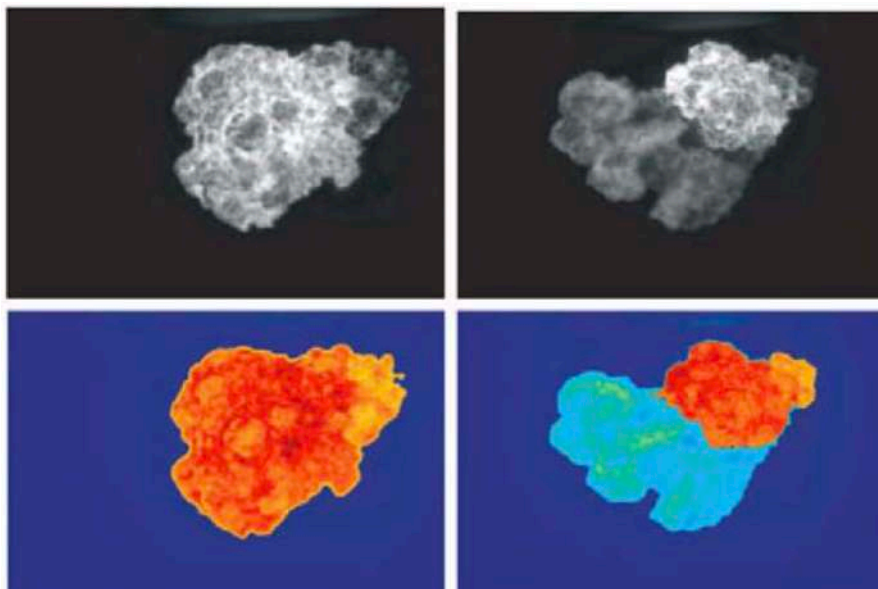


Fig. 28. Llamas en la combustión en el interior del cilindro. Fuente MAN

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 52

En la Fig. 28 se puede observar una combustión real en el interior de un cilindro, la llama naranja corresponde al combustible líquido y la llama azul al combustible gas.

Cuando los motores salieron al mercado, este combustible líquido se correspondía a un 10% del combustible total para la combustión. Siempre modificable a bordo por el operador con un margen aproximado de un 2% , por tanto entre un 8 y un 12%.

MAN BW, tiene un par de motores instalados funcionando continuamente en varias localizaciones del mundo para hacerles pruebas en bancos. En el motor ubicado en Ulsan (Korea), se llegó a tener exclusivamente a GAS, eliminando completamente el combustible piloto, tras ir reduciendo progresivamente para ver hasta donde la combustión era estable, esta información fue recopilada por los técnicos que posteriormente se trasladaron a bordo de los buques para actualizar el software de los motores instalados, en el cual entre otras modificaciones se realizó la reducción de dicho pilotaje, hoy en día están rondando entre el 2%-2,5% del total y el máximo margen del operador es entorno al 0,5% hacia abajo y sobre un 2% hacia arriba. Realmente es un consumo importante que se nota a final de día, pudiendo ajustar sobre 0,5 MT por motor si se ajusta correctamente el índice de combustible piloto.

Tras dicha modificación se tiene que prestar mucha más atención al sistema de tiempos de inyección que se haría anteriormente, puesto que, ahora si se ajusta demasiado en ciertos cilindros se puede provocar un adelanto al encendido y llegarse a escuchar claramente las detonaciones provocadas por el temido “knocking”. Cuando esto sucede ya se disparan las seguridades del

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 53

gas, por tanto se tiene que aumentar manualmente el porcentaje de pilotaje para evitar estos problemas y los daños que puedan provocar.

Ahora con dichas modificaciones en modo Gas los consumos estimados de combustible líquido rondan las 0,9 MT /día a una velocidad media de 18 nudos.

3.12. PROBLEMAS CON LOS SENSORES DE PRESIÓN (PMI).

Otro pequeño problema que se ha tenido en estos motores, eran fallas en el sensor de presión que hace la monitorización continua del cilindro, con el cual el sistema de gestión electrónica del motor va calculando la inyección y variando parámetros de la misma.

En la parte alta de la culata (siendo esta la parte alta a su vez del cilindro), van ubicadas unas válvulas que son las llamadas de purga, que se emplean antes de arrancar el motor, para girarlo a una baja velocidad con dichas válvulas abiertas y así, tras subir el pistón a la zona de compresión, se vería salir algún tipo de líquido como agua o aceite si se tuviera algún problema en el cilindro. En dicha válvula es donde van ubicados los sensores de presión de cada cilindro, puesto que, además si se denotase algún valor extraño esta es la misma ubicación donde se colocaría el elemento medidor de presión calibrado para saber la presión real en el interior del cilindro.

En un primer momento se pensaba que podría ser causado por algún problema en las válvulas manuales de las purgas mencionadas anteriormente.

Pero, tras enviarse varios sensores para su investigación a Dinamarca, los técnicos encontraron signos de corrosión extrema en el acero inoxidable, tanto en el propio sensor como en el adaptador sobre el que va instalado. Después y tras la investigación que se hizo a bordo de algún buque, se detectó que el problema venía cuando los motores viajan a poca carga, generando corrosión

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 54

no solo en el sensor, si no en todas las tuberías, sellos y partes del sistema de PMI.

Entonces, se averiguó que esta baja temperatura y, añadido a que los aislamientos de las tuberías no iban correctamente instalados, causaba una condensación de agua con una gran cantidad de ácido sulfúrico.

Luego, se comprobó la importancia del pequeño aislamiento instalado en la purga , sobretodo a baja carga del motor, puesto que con el aislamiento bien ubicado en su posición, la temperatura en el sensor era 20°C superior a cuando estaba quitado o mal colocado dicho aislamiento, por tanto se dedujo al mismo tiempo que los cilindros que presentaban más este problema, eran

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-40
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 55

los que estaban cerca de las salidas de ventilación de la máquina puesto que estaban siendo enfriados de manera constante con aire del exterior.

Por tanto, el fabricante envió una notificación a todos los buques con lo que se debería vigilar más continuamente estos aislamientos y así conseguir siempre llevar temperaturas superiores al punto de rocío ácido.

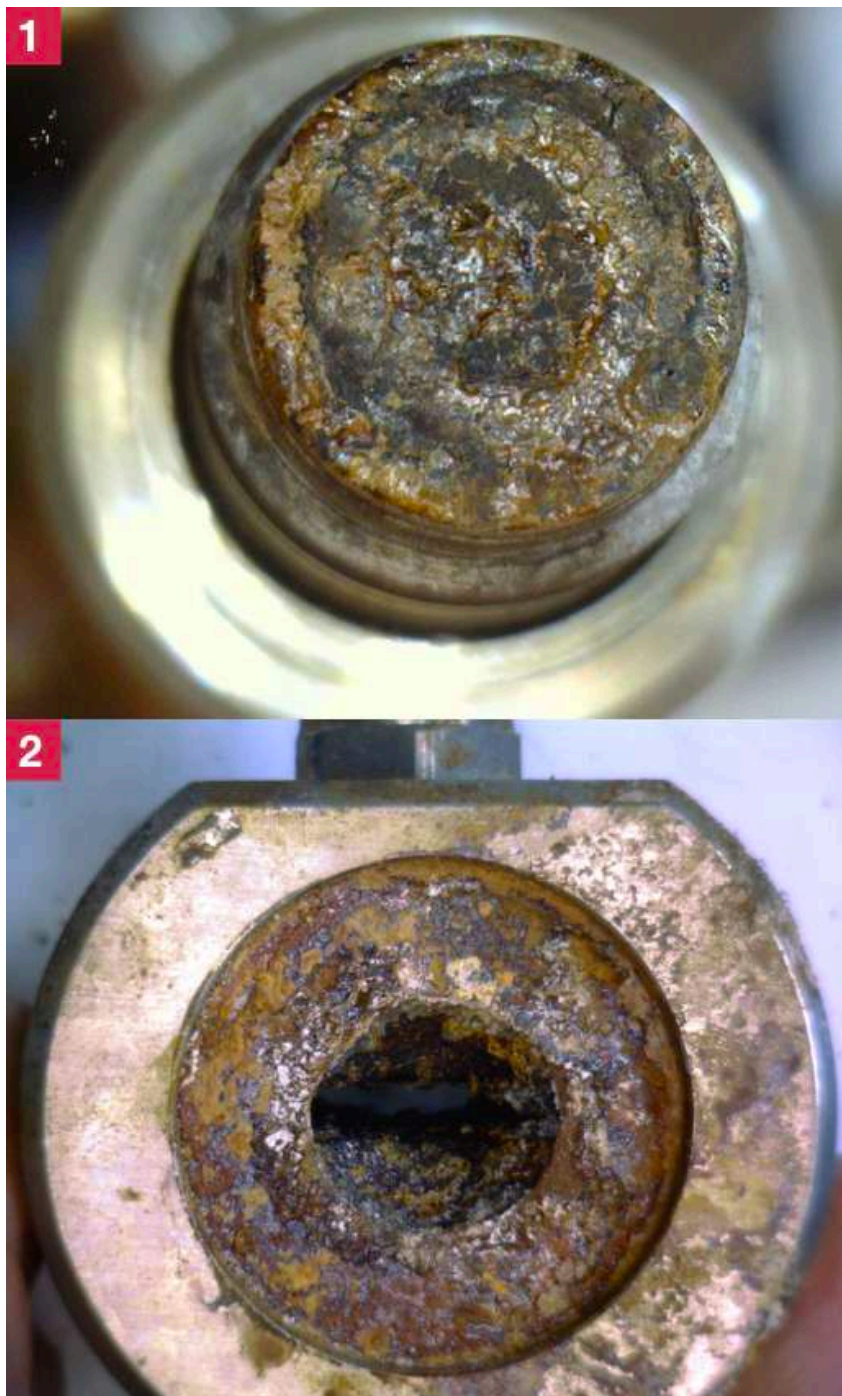


Fig. 29. Sensor de PMI dañado a causa de la corrosión en frío. Fuente MAN

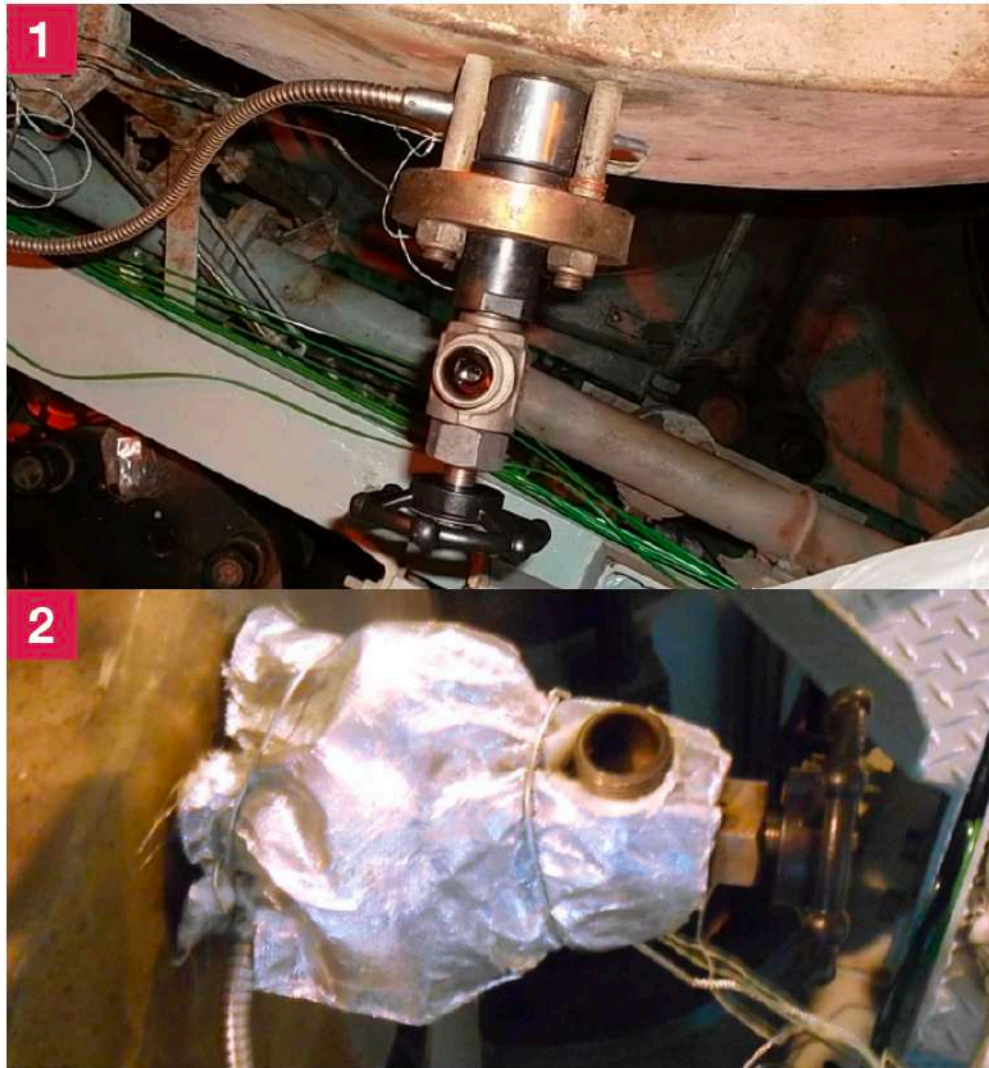


Fig. 30. Válvula de purga con el aislamiento y sin el aislamiento. Fuente MAN

3.13. INTERVALOS DE MANTENIMIENTO

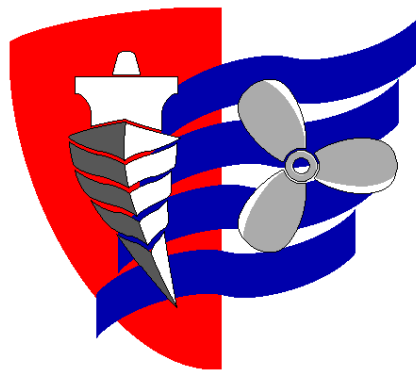
Tras ir realizando los mantenimientos acordes a las tablas iniciales entregadas por el fabricante al armador, se ha ido observando que muchos de esos mantenimientos se han modificado “sobre la marcha” por un desgaste más prematuro de lo inicialmente estimado o bien, por el contrario, por mantenerse en mucho mejores condiciones de las estimadas al llegar a las horas de mantenimiento programadas.

Un ejemplo de mantenimientos que se han adelantado han sido tanto la vida útil de las toberas de los inyectores de gas, como el propio inyector de gas. Aunque en general casi todo el sistema de gas como por ejemplo la window valve, blow off valve y purgue valve, también se les ha adelantado el mantenimiento programado puesto que el fabricante estimaba unas horas de vida demasiado optimistas por la inexperiencia global en este tipo de motores a gas y trabajando a estas presiones y temperaturas.

Por el contrario, mantenimientos que tenían influencia directa con el combustible como por ejemplo limpieza de colector de aire de barridos, limpieza de enfriadores de aire de barrido, se han demorado. En este momento se está estudiando demorar unas 15.000 horas el intervalo de sustitución de los aros de pistones, puesto que los primeros en reemplazarse se sacaron en perfectas condiciones, tanto aros como cabeza de pistón con unas medidas con mucho margen para llegar a lo recomendado o preocupante según el fabricante. Estas demoras vienen marcadas puesto que las impurezas generadas con la utilización de gas como combustible son mucho más bajas que con ningún combustible líquido. Por tanto, se alarga la vida útil de muchos elementos del motor.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 58

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



CONCLUSIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 59

4. CONCLUSIONES

De este trabajo concluimos:

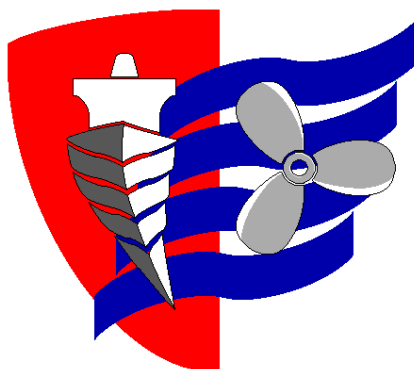
- Es un motor novedoso y el cual está sometido a unas condiciones de funcionamiento muy severas e imprevisibles las cuales son muy difíciles de repetir en un banco de pruebas.
- Los materiales que se han empleado en diferentes equipos inicialmente eran los mismos que ya estaban diseñados para su uso en los motores de gas de 4T, de baja presión, pero las condiciones de funcionamiento de este nuevo motor no son las mismas y esto ha conllevado muchas modificaciones de dichos materiales y sus diseños.
- Debido a la continua evolución en el desarrollo de las nuevas tecnologías, se están modificando elementos y sistemas de trabajo que hasta el momento eran los que se empleaban sin nuevos estudios o problemáticas.
- Para algunas operaciones de mantenimiento se han tenido que acortar las horas de mantenimiento programado, pero para otras, ese tiempo se ha visto alargado de forma muy importante.
- Debido a la gran novedad de este tipo de motor y la urgencia con la que ha sido demandado por el mercado internacional, ha conllevado que se hayan instalado en los buques con demasiada rapidez para su utilización y esto ha provocado que una de las formas de actuación más importante sea la llamada “sistema de prueba y error”.
- Se prevé que durante un largo periodo de tiempo seguirán ofreciendo problemas y fallos tanto en los sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos, así como en los materiales utilizados en las diferentes piezas, es por eso por lo que es de vital importancia el aprendizaje continuo del personal encargado del mantenimiento y conducción de este equipo.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 60

- La gran especialización del personal de la sala de máquinas que controla estos buques y estos motores hace necesario una preparación técnica tanto teórica como práctica, que no es tan necesaria en otro tipo de buques.
- Los armadores han de conocer y valorar a estos profesionales altamente cualificados, que están manteniendo en condiciones de funcionamiento perfecto los buques.

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 61

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



BIBLIOGRAFÍA

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020
	REV: 0 PÁG. 62

5. BIBLIOGRAFÍA

5.1. DOCUMENTACIÓN.

- MAN & BW SL2016-621/CLN
- MAN & BW SL2018-662/JOF
- MAN & BW SL2018-659/JAP
- MAN & BW SL2017-650/SRJ
- MAN & BW SL2017-644/JERA
- MAN ACADEMY COPENHAGUE – CURSO MEGI ENGINES FEBRERO 2018.
- Tablas de la sociedad de clasificación Det Norske Veritas para los precios actuales de combustibles, LNG como combustible marino: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html> (Noviembre 2020).
- Kees Kuiken. Gas–And dual-Fuel Engines for ship propulsión, power plants and cogeneration. First Edition. Ed. Target Global Energy Training. Onnen-The Netherlands. 2016.
- García Garrido, S.; Fraile Chico,D; Fraile Martín, J. *Motores Alternativos de gas. Motores térmicos para generación eléctrica*. Ed. Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid. 2010

TRABAJO FIN DE MÁSTER	REF: 001-70	
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA	FECHA: 19/11/2020	
	REV: 0	PÁG. 63



Escuela Técnica Superior de Náutica

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de M á s t e r de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Rev. 1 (Aprobado en Junta de Escuela de 22 de junio de 2016)